

Introduzione alla progettazione di ANTENNE MIMO

Ing. Francesco Zaccarini
ElettroMagnetic Services s.r.l.

Nelle attuali reti di comunicazione wireless, che spaziano dalle reti 4G-5G alle applicazioni *WiFi* ed *IoT*, l'impiego di sistemi multi-antenna, sia ai terminali trasmettenti che riceventi del radiocollegamento, permette di aumentare drasticamente la capacità di canale e, a parità di velocità di connessione, la copertura del servizio.

Un apparato che fa uso della tecnologia *MIMO* utilizza quindi più di un'antenna: questi elementi radianti devono pertanto avere caratteristiche tecniche adatte, sia nel caso in cui implementino un'antenna multi-porta sia che vengano integrati all'interno di un dispositivo *client* o di un terminale mobile.

Ben consapevoli che si tratta di una materia complessa che non può essere trattata esaustivamente in questa sede, nell'approfondimento tecnico che segue faremo un breve introduzione alle antenne MIMO ed ai principali parametri dei quali è necessario tener conto in fase di progetto.

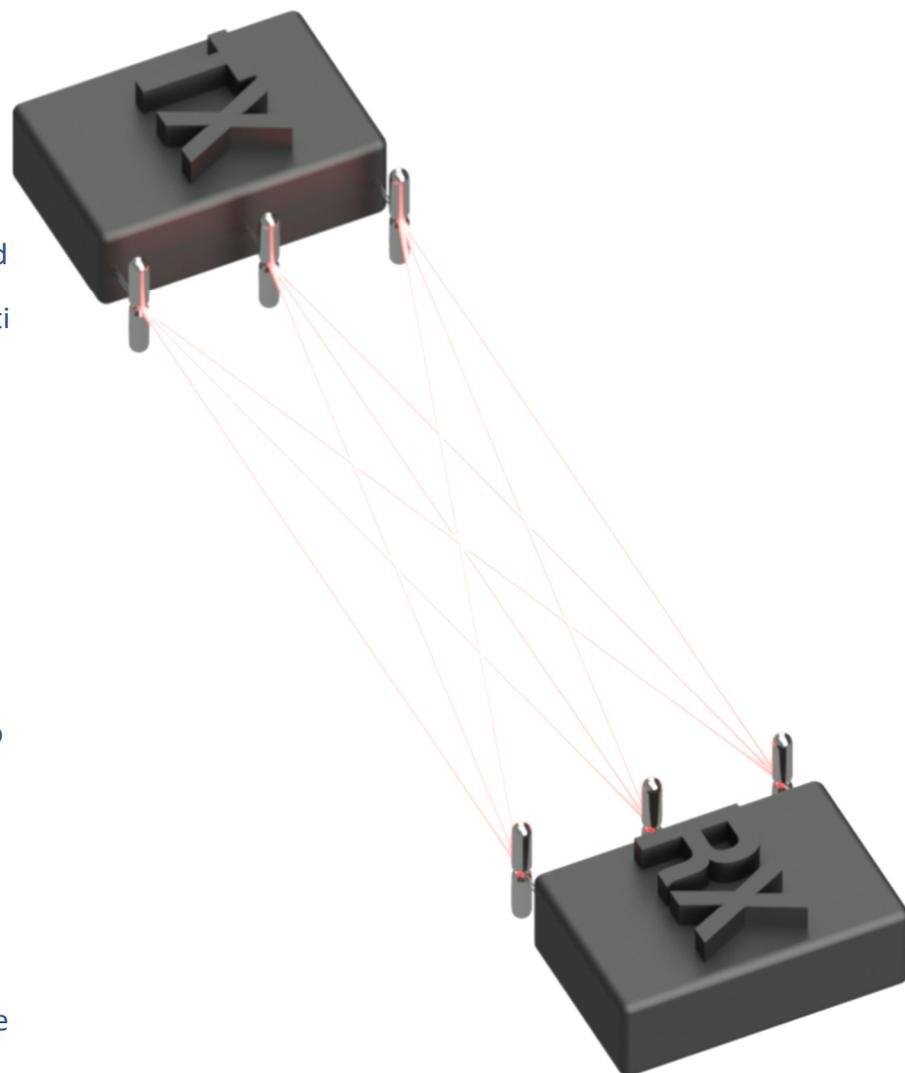


Figura 1.1

Schema di principio di un sistema *MIMO* (Multiple Input Multiple Output).

1. I sistemi multi-antenna: dal “diversity” al MIMO.

Per decenni il meccanismo di propagazione delle onde radio chiamato *multipath* (o, in italiano, *cammini multipli*), che interessa le bande di frequenza VHF e superiori in scenari caratterizzati da numerosi ostacoli naturali e/o artificiali, ha rappresentato un inconveniente alla realizzazione di sistemi di comunicazione stabili ed affidabili.

In un radiocollegamento trasmettitore-ricevitore di tipo tradizionale (*SISO, Single Input Single Output*), che fa uso di una sola antenna ad ogni estremità del link, la contemporanea presenza di più raggi elettromagnetici (diretto e riflessi) che arrivano al ricevitore attraverso percorsi differenti possono infatti provocare dei fenomeni di affievolimento o cancellazione del segnale ricevuto (*fading*), essendo quest'ultimo dato dalla somma vettoriale di un elevato numero di contributi, in accordo con una determinata distribuzione statistica.

Nella maggior parte dei casi quindi, tutti questi segnali riflessi agiscono come interferenze sul segnale radio, la cui potenza disponibile all'ingresso del ricevitore è sostanzialmente attribuibile al raggio diretto o principale. In queste condizioni la qualità del segnale si degrada molto velocemente: basti pensare ad esempio ai “fantasmi” talvolta visibili nelle immagini del televisore, caratteristico effetto del *multipath* sul segnale analogico.

Nelle stazioni radio base GSM/DECT dei primi anni '90 (**Figura 1.2**), gli effetti negativi dei cammini multipli sono stati ridotti introducendo la ricezione in diversità di spazio (*spatial diversity*) o di polarizzazione (*polarization diversity*). Queste sono tecniche che permettono di aumentare l'affidabilità del canale hertziano impiegando due antenne distinte, installate ad una certa distanza tra loro oppure impieganti due polarizzazioni ortogonali (H/V o +45°/-45°).

In questo modo, supponendo di poter contare su di una elevata indipendenza statistica tra i due segnali che giungono ad una o all'altra antenna, la probabilità totale di fuori servizio del canale viene ridotta, diventando sostanzialmente pari alle probabilità di fuori servizio dei singoli canali associati alle diverse antenne, aumentando perciò l'affidabilità del collegamento.

Si arriva così alla metà degli anni 2000, quando viene introdotta commercialmente la tecnologia *MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*, **Figura 1.1**) che, contrariamente al *diversity* che cerca di minimizzare gli effetti del *multipath*, utilizza questo meccanismo di propagazione come una vera e propria risorsa.

Questa tecnologia fa uso di un certo numero di antenne, potenzialmente anche elevato, sia dal lato trasmittente che ricevente del collegamento ed associa ad ogni possibile coppia antenna trasmittente-ricevente un certo flusso di dati mediante un principio di moltiplicazione spaziale (*spatial multiplexing*).

Il meccanismo del *multipath* permette allora di inviare flussi multipli di dati dalle diverse antenne del trasmettitore a quelle del ricevitore, suddividendo così la capacità di canale tra i vari raggi elettromagnetici che caratterizzano il mezzo trasmissivo.

Viceversa, è interessante notare come un sistema multi-antenna basato su questo principio non funzioni adeguatamente nel caso di un radiocollegamento nel quale il meccanismo del *multipath* sia assente.



Figura 1.2

Pannelli DCS/UMTS in doppia polarizzazione.

2. Tecniche di *diversity* per le antenne.

Sia che si tratti di ricezione *in diversità* che della più sofisticata tecnologia *MIMO*, le due o più antenne che si utilizzano devono risultare indipendenti tra loro, ovvero i segnali che individualmente ricevono devono essere il più possibile *scorrelati* tra loro.

Questa fondamentale caratteristica che le antenne devono avere si ottiene utilizzando tre criteri o, il più delle volte, una loro combinazione:

- a) Diversità di spazio (*spatial diversity*);
- b) Diversità di polarizzazione (*polarisation diversity*);
- c) Diversità di fascio (*beam diversity*).

Nella *diversità di spazio*, la decorrelazione tra i segnali captati viene ottenuta ponendo le antenne ad una certa distanza l'una dall'altra (espressa in termini di lunghezze d'onda λ).

Nella *diversità di polarizzazione*, la decorrelazione tra i segnali ricevuti viene ottenuta utilizzando antenne con polarizzazioni caratteristiche mutuamente ortogonali, ad esempio H e V od inclinate a $+45^\circ$ e -45° .

Nella *diversità di fascio*, la decorrelazione tra i segnali ricevuti viene ottenuta mediante dei diagrammi di radiazione tra loro diversi e, possibilmente, complementari.

3. Due parametri significativi delle antenne MIMO.

Il grado di indipendenza tra le porte di un sistema multi-antenna viene descritto mediante il *coefficiente di correlazione* e l'*isolamento*. Per chiarire meglio questi due parametri, immaginiamo di riferirci ad un sistema ricevente che impiega due sole antenne.

Il *coefficiente di correlazione* è un indicatore di quanto i diagrammi di radiazione delle due antenne siano simili tra loro, ovvero di quanto essi siano in grado di operare una sorta di filtraggio spaziale dei raggi elettromagnetici che arrivano al ricevitore da direzioni e con polarizzazioni differenti. Il calcolo del coefficiente di correlazione, che varia tra 0 (antenne con diagrammi di radiazione completamente distinti) ed 1 (antenne con diagrammi di radiazione identici), è piuttosto complesso e deriva dalla misura delle funzioni di direttività delle singole antenne sull'intero angolo solido.

L'*isolamento* tra le due antenne, definito come $-20 \cdot \log_{10} |S_{12}|$ (in dB), definisce invece il grado di disaccoppiamento tra gli elementi radianti, misurato alle rispettive porte 1 e 2.

È importante osservare che spesso esiste un legame tra similarità dei diagrammi di radiazione e relativo isolamento: in letteratura si possono trovare espressioni chiuse, più semplici di quella derivate dalle misure di radiazione, che in casi particolari permettono di stimare il coefficiente di correlazione a partire dai parametri *S* delle due antenne, quindi in forma molto più agevole rispetto a delle misure di radiazione.

Dal momento che un approfondimento matematico esula dagli scopi del presente articolo, limitiamoci a chiarire questi concetti in modo intuitivo, attraverso le immagini di **Figura 2.1** e **Figura 2.2**, che mostrano due dipoli con cui è possibile comprendere quanto sopra descritto.

Nella prima figura, la situazione (**a**) mostra due antenne molto vicine tra loro e caratterizzate da un elevato grado di accoppiamento in campo vicino nonché da due diagrammi di radiazione quasi sovrapposti: in questo caso, il peggiore, si ha un coefficiente di correlazione prossimo ad 1.

L'esempio (**b**) rappresenta un paio di dipoli collineari, caratterizzati quindi da un buon isolamento ma dei fasci con le stesse caratteristiche di forma e di polarizzazione.

Invece, nella seconda figura, si fa riferimento a due situazioni ideali. L'esempio (c) mostra due dipoli in configurazione back-to-back che permettono di ottenere sia un elevato isolamento che due diagrammi di radiazione distinti e complementari.

Infine la configurazione (d) evidenzia due dipoli in polarizzazione ortogonale: uno schema che permette di ottenere sia un buon isolamento che un basso indice di correlazione tra i diagrammi. In entrambi i casi si hanno coefficienti di correlazione prossimi a 0.

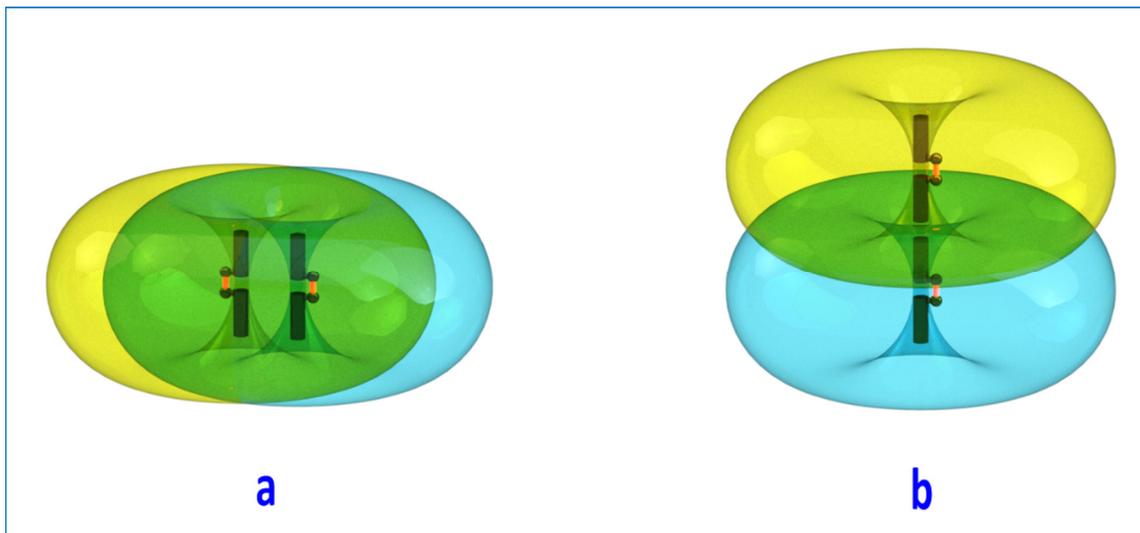


Figura 2.1

Esempi di casi non ideali (alto coefficiente di correlazione): (a) coppia di antenne con diagrammi di radiazione quasi sovrapposti. (b) coppia di antenne con buon isolamento e diagrammi di radiazione parzialmente sovrapposti.

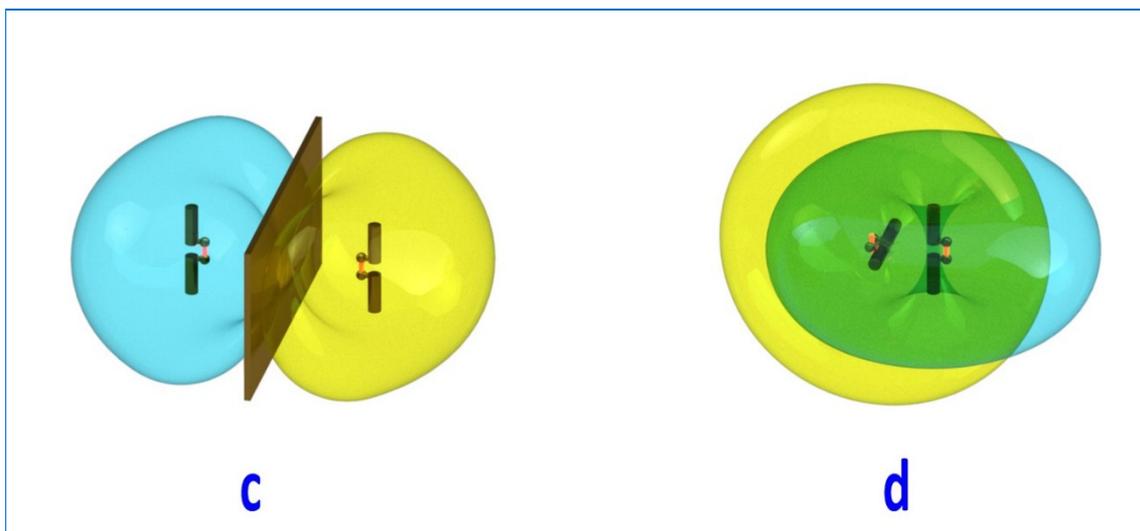


Figura 2.2

Esempi di situazioni ideali (basso coefficiente di correlazione): (c) coppia di antenne con alto isolamento e diagrammi di radiazione complementari. (d) coppia di antenne con alto isolamento e diagrammi di radiazione con polarizzazioni ortogonali.

4. Il progetto di antenne MIMO.

In un apparato *MIMO*, che sfrutta il meccanismo fisico del *multipath* per aumentare la capacità di canale, le tecniche di *diversity* illustrate nel paragrafo 2 stanno alla base del progetto del sistema multi-antenna.

Infatti, le prestazioni di un tale sistema dipendono da numerosi fattori, quali ad esempio:

- Le antenne dovrebbero avere un certo grado di direttività, controllabile attraverso i gradi di libertà che sono possibili nel progetto;
- Le antenne dovrebbero avere una qualche sorta di discriminazione cross-polare;
- Le antenne dovrebbero avere dei fasci di radiazione orientati in direzioni diverse, possibilmente tra loro complementari, così da coprire tutto l'angolo solido giro o buona parte di esso;
- L'accoppiamento mutuo tra le antenne dovrebbe essere minimo (corrispondente ad un buon livello di isolamento);
- In un sistema multi-antenna, la mutua prossimità degli elementi radianti non dovrebbe portare ad una riduzione di efficienza degli stessi;
- In un sistema multi-antenna, la mutua prossimità degli elementi radianti non dovrebbe peggiorarne l'adattamento e tutte le porte dovrebbero essere adeguatamente adattate sulla loro impedenza caratteristica nominale (50Ω).

Se ad esempio consideriamo un prodotto reale come il router di **Figura 3.1** e facciamo riferimento a quanto sopra esposto, è intuitivo stimare l'impatto che ognuno di questi fattori ha sulle antenne, che sono dei dipoli coassiali omnidirezionali tra loro paralleli e molto vicini: quantomeno andrebbero opportunamente orientati in fase di installazione del dispositivo in modo da rimanere il più possibile disaccoppiati tra loro. Come infatti si evince dalla figura stessa, all'atto pratico spesso prevalgono scelte di tipo industriale e/o commerciale che portano a realizzare antenne non propriamente adatte a sfruttare appieno le potenzialità della tecnologia *MIMO*.

Sebbene ogni realizzazione *custom* rappresenti un caso a sé stante, possiamo suddividere i progetti delle antenne *MIMO* mediante due criteri principali, utili a far comprendere le problematiche che si possono incontrare nell'affrontare tali realizzazioni:

- Progetti di antenne convenzionali od antenne integrate nell'apparato;*
- Progetti di antenne a singola banda od antenne multibanda.*

Sulla base di queste macro categorie prendiamo quindi in considerazione alcune tipologie di antenna.

Antenne convenzionali.

Con questo termine facciamo riferimento ad antenne non integrate, ovvero esterne all'apparato e perciò compatibili con più dispositivi od installazioni. Per queste antenne, la possibilità di rilassare il vincolo dimensionale realizzando elementi radianti più grandi e più spazati (in termini di λ), permette di ottenere specifiche di isolamento migliori e diagrammi di radiazione più direttivi, favorendo l'implementazione delle tecniche di *diversity* sopra esposte.



Figura 3.1

Implementazione pratica di un sistema multi-antenna MIMO su di un router WiFi per applicazioni industriali.

Questo genere di progetti dà infatti la possibilità di:

- utilizzare elementi radianti standard (dipolo, patch, ecc.), ottenendo una migliore forma e direttività del fascio di radiazione, nonché una polarizzazione caratteristica ben definita;
- utilizzare elementi radianti con una distribuzione di corrente simmetrica, requisito importante per ottenere un elevato grado di isolamento in antenne a doppia polarizzazione.
- isolare gli elementi radianti da piani immagine o di massa comuni, mediante l'introduzione di dispositivi di simmetrizzazione nei punti di alimentazione (*balun*).

La **Figura 3.2** riporta due esempi di antenne *custom*, di tipo *convenzionale*, per applicazioni *diversity* e *MIMO*.

Nel primo caso, della *foto a sinistra*, è raffigurato un sistema di antenne a 2.4 GHz e 5.8 GHz con degli array bidirezionali in polarizzazione orizzontale e verticale: questo sistema, sviluppato appositamente per applicazioni *Smart-Road* ed installato sul lato della sede autostradale, deve garantire prestazioni e caratteristiche di copertura ottimali con i numerosi veicoli in movimento. Questi ultimi rappresentano anche la causa principale di riflessioni del segnale radio e della presenza di *multipath*.

Nel secondo caso (*fotografia a destra*) è mostrata un'antenna *MIMO* compatta su PCB, operante nelle bande 690÷960MHz e 1700÷2700 MHz: in questo caso sono stati utilizzati dei dipoli a doppia risonanza disposti in modo da ottenere una diversità di polarizzazione e, anche se in minor misura, nel fascio di radiazione.



Figura 3.2

Esempi di antenne convenzionali per *diversity* e *MIMO*.

Antenne integrate.

Nelle antenne integrate, ovvero inserite all'interno di un dispositivo od apparato, lo sviluppo di un sistema multi-antenna è di fondamentale importanza per le recenti applicazioni nel campo del 5G, WiFi ed IoT.

Com'è intuibile, in questo caso l'approccio al progetto è differente, e risulta caratterizzato dai seguenti fattori:

- esistenza di vincoli dimensionali che costringono alla coesistenza di più elementi radianti in spazi ristretti;
- gli altri componenti elettrici, elettronici, della struttura meccanica dell'apparato possono influenzare le caratteristiche elettriche delle antenne;
- necessità di utilizzare elementi radianti con dimensioni ridotte (antenne corte) e quindi poco direttive;
- impiego di tipologie di elementi radianti che si discostano apprezzabilmente dalle strutture canoniche;
- elevate asimmetrie nelle correnti;
- più antenne condividono stesso piano di massa, che di solito consiste nel "layer GND" della PCB.

Tutti questi fattori portano a dover studiare attentamente la tipologia e la collocazione degli elementi radianti, utilizzando delle tecniche particolari per il miglioramento dell'isolamento tra le antenne.

Facciamo un esempio riferendoci alla **Figura 3.3**, dove sono rappresentate due PCB con antenne integrate IFA (*Inverted F Antenna*), che condividono lo stesso piano di massa.

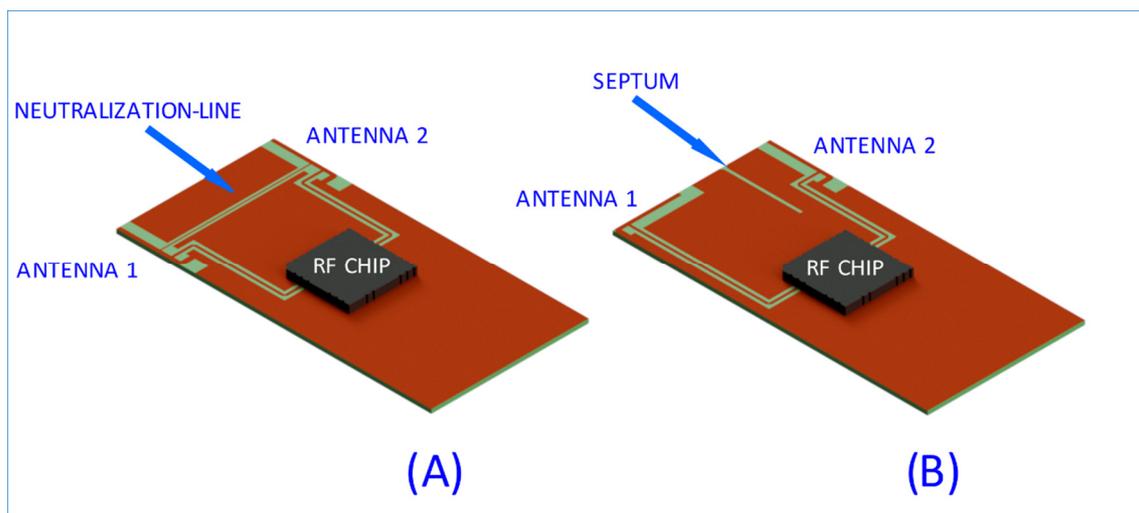


Figura 3.3

Esempi di antenne MIMO integrate su PCB, con possibili elementi circuitali per migliorare l'isolamento.

Nell'esempio (A), le antenne hanno la stessa polarizzazione ed il grado di diversità tra i due diagrammi di radiazione è dato esclusivamente dalla asimmetria del piano di massa rispetto ai singoli elementi radianti.

È intuitivo affermare che i diagrammi di radiazione sono simmetrici rispetto al piano longitudinale che identifica la simmetria geometrica della PCB (Figura 3.4).

Il miglioramento del grado di isolamento tra i due elementi radianti è ottenuto mediante una *linea di neutralizzazione* che collega elettricamente i due elementi radianti ed agisce come fosse una specie di *notch*, con un principio che ricorda quello utilizzato sui risonatori dei filtri RF.

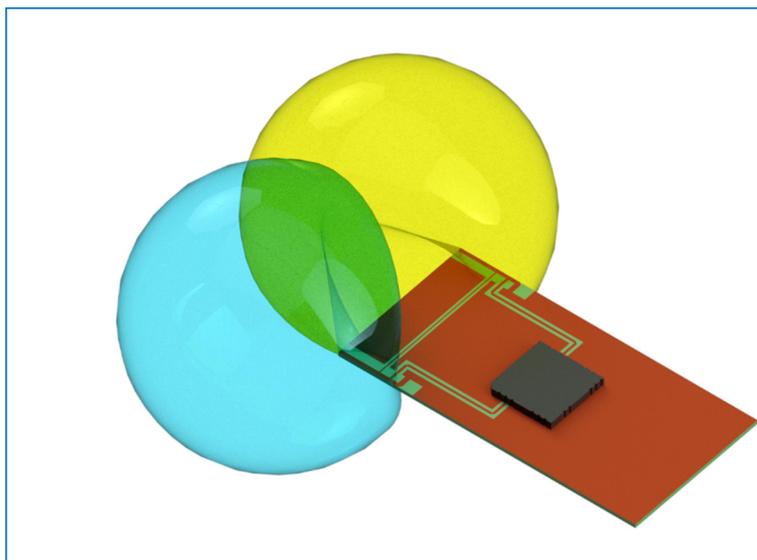


Figura 3.4

Rappresentazione schematica dei diagrammi di radiazione delle antenne *IFA* di **Figura 3.3 (A)**.

Un secondo esempio è quello del caso **(B)**, dove le due *IFA* sono disposte su due lati perpendicolari della *PCB*, implementando quindi una diversità di polarizzazione. Dal momento che in questo tipo di antenne un apprezzabile contributo alla radiazione è dato dai bordi della *PCB*, non dobbiamo aspettarci di ottenere elevati valori di *XPD*.

Anche qui i due elementi radianti condividono lo stesso *layer* di massa del circuito stampato: l'ottimizzazione dell'isolamento viene realizzata inserendo un setto (implementato con un *notch* nel rame della *PCB*) per separare le due distribuzioni di corrente impresse dai singoli elementi radianti.

Possono essere utilizzate altre tecniche per migliorare l'isolamento e, nelle antenne integrate, ogni singolo scenario va studiato caso per caso.

Nonostante la disponibilità di sofisticati software di simulazione elettromagnetica, non è per nulla scontato che le simulazioni al computer portino a risultati sempre veritieri, dal momento che all'atto pratico diventa spesso difficile modellizzare adeguatamente tutti i componenti e le strutture che si trovano in prossimità delle antenne integrate.

5. Conclusioni.

Lo scopo di questo approfondimento tecnico è quello di fornire una breve introduzione sulla tecnologia *MIMO*, spiegando sinteticamente come delle antenne adatte, sviluppate ad hoc, possano ulteriormente migliorare le prestazioni di questi innovativi sistemi multi-antenna.

È infatti possibile realizzare un sistema multi-antenna i cui elementi radianti vengono customizzati in funzione delle caratteristiche di installazione ed impiego del sistema stesso, sfruttando così al meglio la presenza di cammini multipli presenti in quel determinato scenario operativo, dove l'apparato *MIMO* si troverà ad operare.

Dopo oltre cent'anni dalla nascita del wireless, ancora una volta l'antenna, anzi in questo caso *le antenne*, rimangono il punto di forza di un sistema di comunicazione via radio e competenza ed esperienza nel realizzarle rimangono sempre fondamentali.

Tutte le informazioni e le esperienze riportate in questo articolo sono frutto dell'attività di **progettazione, sviluppo e realizzazione di antenne custom professionali** svolta da **ElettroMagnetic Services Srl** con il metodo **AntennaSuMisura**.

Per **domande, chiarimenti o approfondimenti** in merito a questo o ad altri argomenti riguardanti le **antenne professionali** scrivi a bollini@elettromagneticservices.com

Grazie per il tempo che hai dedicato alla lettura di questo articolo.

Trovi l'elenco completo delle nostre pubblicazioni tecniche cliccando qui:

<https://www.elettromagneticservices.com/news>

The logo for AntennaSuMisura features the word "AntennaSuMisura" in a large, blue, stylized script font. To the right of the text, there is a blue icon of a Wi-Fi signal, consisting of three curved lines radiating from a central point.

by

ElettroMagnetic Services
SRL

Trasmetti la tua eccellenza!